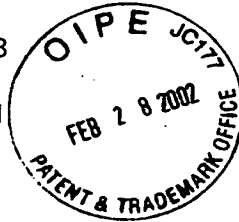


44

Atty. Dkt. No. 086531-0130

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

Applicant: Mikihide NAKAMARU et al.  
Title: REACTOR CORE AND METHOD FOR OPERATING NUCLEAR REACTOR  
Appl. No.: 09/978,308  
Filing Date: 10/17/2001  
Examiner: Unassigned  
Art Unit: 3641



**CLAIM FOR CONVENTION PRIORITY**

Commissioner for Patents  
Washington, D.C. 20231

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application filed in the following foreign country is hereby requested, and the right of priority provided in 35 U.S.C. § 119 is hereby claimed.

In support of this claim, filed herewith is a certified copy of said original foreign application:

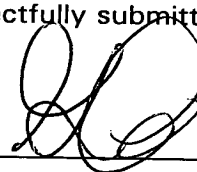
- Japanese Patent Application No. 2000-317168 filed October 17, 2000.

Respectfully submitted,

Date: February 28, 2002

FOLEY & LARDNER  
Washington Harbour  
3000 K Street, N.W., Suite 500  
Washington, D.C. 20007-5143  
Telephone: (202) 672-5414  
Facsimile: (202) 672-5399

By

 34371

Richard L. Schwaab  
Attorney for Applicant  
Registration No. 25,479

09/972,308  
Filed 10/17/01  
Nakamura et al.

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

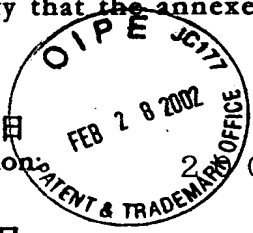
別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2000年10月17日

出 願 番 号  
Application Number: 特願2000-317168

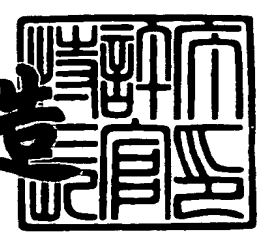
出 願 人  
Applicant(s): 株式会社東芝



2001年 9月13日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2001-3084593

【書類名】 特許願

【整理番号】 7DB0090041

【提出日】 平成12年10月17日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G21C 7/00  
G21C 1/08

【発明の名称】 原子炉炉心および原子炉運転方法

【請求項の数】 13

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
                                横浜事業所内

    【氏名】 中丸 幹英

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
                                横浜事業所内

    【氏名】 日置 秀明

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
                                横浜事業所内

    【氏名】 斉藤 健彦

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
                                横浜事業所内

    【氏名】 平岩 宏司

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
                                横浜事業所内

    【氏名】 奈良林 直

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

【氏名】 大水 諭

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

【氏名】 下田 強

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県川崎市川崎区浮島町 2 番 1 号 株式会社東芝  
浜川崎工場内

【氏名】 新井 健司

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

【氏名】 師岡 慎一

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8 番地 株式会社東芝  
横浜事業所内

【氏名】 鈴木 征治郎

【特許出願人】

【識別番号】 000003078

【氏名又は名称】 株式会社 東芝

【代理人】

【識別番号】 100078765

【弁理士】

【氏名又は名称】 波多野 久

【選任した代理人】

【識別番号】 100078802

【弁理士】

【氏名又は名称】 関口 俊三

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011899

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 原子炉炉心および原子炉運転方法

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 燃料棒とウォータロッドとを正方格子状に配置して構成される複数の燃料集合体を一定ピッチで正方格子状に配列し、これらの燃料集合体の隣接する 4 体の対向隙間に十字型制御棒の各翼をそれぞれ挿入配置する原子炉炉心において、前記十字型制御棒の各翼幅（B）と前記燃料集合体の 1 ピッチを一边とする正方形の面積で与える燃料格子面積（S）との比（B／S）を 0.06 以上に設定したことを特徴とする原子炉炉心。

【請求項 2】 燃料集合体を構成する燃料棒は、核燃料物質として、ウラン、プルトニウムもしくはその両者の酸化物もしくは窒化物を含むことを特徴とする請求項 1 記載の原子炉炉心。

【請求項 3】 燃料集合体の周辺部に配置される燃料棒は、核燃料物質としてトリウムを含むことを特徴とする請求項 1 または 2 記載の原子炉炉心。

【請求項 4】 燃料集合体を構成する一部の燃料棒は可燃性毒物を添加したものとし、その可燃性毒物の濃度を、可燃性毒物反応度が燃料取出時に実質的に零となる濃度に調整したことを特徴とする請求項 1 から 3 までのいずれかに記載の原子炉炉心。

【請求項 5】 可燃性毒物は、直径が 50 ミクロン以上 200 ミクロン以下の純粋  $Gd_2O_3$  粒子を含むガドリニアであって、前記粒子が核燃料物質間に分散して存在し、かつガドリニアの当該燃料棒に対する重量割合が 15 wt % 以上であることを特徴とする請求項 4 記載の原子炉炉心。

【請求項 6】 ガドリニアのガドリニウム同位体のうち奇数質量数のガドリニウム同位体の合計の濃縮度が天然のガドリニウムよりも高濃縮度であることを特徴とする請求項 5 記載の原子炉炉心。

【請求項 7】 装荷される燃料集合体の全てについて、核分裂性物質平均濃縮度が同一とされていることを特徴とする請求項 1 から 6 までのいずれかに記載の原子炉炉心。

【請求項 8】 燃料集合体の核分裂性物質濃度が燃料集合体の下部側で高く

、上部側で低く、かつ下部側の濃縮度と上部側の濃縮度との差が 0.3 wt % 以上であることを特徴とする請求項 1 から 7 までのいずれかに記載の原子炉炉心。

【請求項 9】 十字型制御棒は上部から挿入する構成とされていることを特徴とする請求項 1 から 8 までのいずれかに記載の原子炉炉心。

【請求項 10】 十字型制御棒の有効部分がすべてハフニウムで構成されており、そのハフニウム厚さが 0.8 cm 以上であることを特徴とする請求項 1 から 9 までのいずれかに記載の原子炉炉心。

【請求項 11】 請求項 1 から 10 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、余剰反応度を 5 %  $\Delta k$  以上、10 %  $\Delta k$  以下として運転することを特徴とする原子炉運転方法。

【請求項 12】 請求項 1 から 10 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、出力運転中の炉心平均ボイド率の最大値を運転サイクル末期以外の時点で発生させるとともに、炉心平均ボイド率の最小値を運転サイクル末期の時点で発生させ、かつ炉心平均ボイド率の最大値と最小値との差を 20 % 以上とすることを特徴とする原子炉運転方法。

【請求項 13】 請求項 1 から 10 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、制御棒の 30 % 以上を挿入して運転することを特徴とする原子炉運転方法。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は、沸騰水型原子炉に適用される原子炉炉心および原子炉運転方法に係り、特に燃料交換を行わずに連続して 15 年以上の長期運転を可能とした原子炉炉心および原子炉運転方法に関するものである。

##### 【0002】

#### 【従来の技術】

現在商用として使われている沸騰水型原子力発電所では、プラントの運転サイクルが最大でも 2 年程度であり、1 サイクルが終わるとプラントを止めて原子炉圧力容器の蓋を開け、定期検査及び燃料交換を実施している。この場合、使用済

み燃料を原子炉建屋の上階に設置される使用済み燃料プールへ移送保管するため、原子炉ウェルは復水貯蔵槽または圧力抑制プールからの水移送により水張りされた状態とされる。この状態で、原子炉圧力容器内に残った燃料の位置を調整し、その後に新燃料を装荷している。

## 【0003】

プラントの定期検査が終わると、原子炉ウェルの水を液体廃棄物処理系または燃料プール浄化系のろ過脱塩器等で処理し、再度復水貯蔵槽または圧力抑制プールに戻している。これらの一連の作業は、プラントの定期検査の工程上クリティカルなパスとなっており、定期検査の工程及び作業工数を増加させている要因である。一方、燃料交換を行い、使用済み燃料を使用済み燃料プール内に保管しておくということは、その燃料の取り扱い管理の仕方によっては核不拡散上懸念される材料の一つである。

## 【0004】

従来、沸騰水型原子炉の炉心は、燃料棒とウォータロッドとを正方格子状に配置して構成される複数の燃料集合体を一定ピッチで正方格子状に配列し、これらの燃料集合体の隣接する4体の対向隙間に十字型制御棒の各翼をそれぞれ下方から挿入する構成となっている。そして、燃料集合体の幅は1/2フィート（15.24 cm）程度、十字型制御棒の各翼幅は12 cm程度とされている。すなわち、十字型制御棒の各翼幅（B）と燃料集合体の1ピッチを一辺とする正方形の面積で与える燃料格子面積（S）との比（B/S）は0.051程度となっている。

## 【0005】

このような大きさの燃料集合体と十字型制御棒を用いた従来の沸騰水型原子炉では、1炉心あたりの十字型制御棒の個数は電気出力100万kWあたり150個程度であり、運転時においてはこれらのうち一部の制御棒を使用して原子炉の余剰反応度を抑制しているのが普通となっている。

## 【0006】

この一部挿入される制御棒としては、燃焼度が進んで反応度の比較的低くなった燃料集合体に囲まれた位置の制御棒（コントロールセルと称される）が用いら



れる場合が多く、この場合に運転中の反応度調整に使用される制御棒数は全制御棒のせいぜい2割程度となっている。

## 【0007】

また、従来の原子炉の余剰反応度の大きさは、運転中の種々の変動や計画の変更、あるいは解析上の誤差などがあっても支障なく運転を持続できるように、ほとんどの期間において、およそ1% $\Delta k$ 以上、通常は2% $\Delta k$ 程度の値となるよう設定されており、1年程度の運転においては、コントロールセルとしての制御棒によって余剰反応度を抑制している。

## 【0008】

沸騰水型原子炉における反応度の調節には、上記の制御棒だけでなく強制循環による炉心流量制御も用いられている。この炉心流量制御においては炉心流量の増加、減少により炉内のボイド率をそれぞれ減少、増大できるため、炉心反応度を増大、減少させて制御棒よりも細やかな反応度調整を行える。この炉心流量調節により、いわゆる流量スペクトルシフト運転も行われる。流量スペクトル運転方式は、運転サイクル前半において循環流量を抑制してボイド率を高め、その後、その後に炉心流量を増加してボイド率を低めとする運転方式を指す。

## 【0009】

この運転方式においては、運転サイクル前半でボイド率を高めることにより反応度を抑制する効果とともに、ウラン238の中性子吸収を促進してプルトニウムへの転換をさせる効果がある。運転サイクル後半でボイド率を低めると、転換されたプルトニウムが核分裂性物質として有効に働いて反応度をより高め、結果としてウラン235濃縮度を低くすることが可能となる。ただし、このような炉心流量によるスペクトルシフト運転では、調整できる炉心流量の幅が制限されているため、調整できるボイド率の範囲も限定されたものとなり、実際にはサイクル前半のボイド率と後半のボイド率との差はそれほど大きくできない。

## 【0010】

炉心の余剰反応度については、可燃性毒物による負の反応度を利用して、炉心全体で燃焼が進んでも余剰反応度が大きく変化しないように調整する方法が用いられている。すなわち、可燃性毒物は燃焼に伴って負の反応度価値が減少（燃料

集合体の反応度は増加)し、可燃性毒物反応度がなくなった以降の燃焼度では核分裂性物質の減少により燃料集合体の反応度は減少するので、従来の沸騰水型原子炉では毒物反応度が1運転サイクルで丁度なくなるように設定することにより、炉心の平均として燃焼度による余剰反応度変化を小さく維持している。

## 【0011】

さらに、可燃性毒物の反応度を調節するために、1運転サイクルに相当する燃焼度に依存して可燃性毒物の濃度を調整している。すなわち、可燃性毒物は酸化ウランなどの核分裂性物質(通常はセラミックス)とされているが、これらと均一で安定した、いわゆる固溶体となっていることが燃料ペレットの構造安定性上必要である。このため、可燃性毒物濃度は一定以上にすることができず、従来の沸騰水型原子炉では、この一定以下の濃度の範囲で可燃性毒物を使用してきた。

## 【0012】

また、可燃性毒物としては天然のガドリニウムを用いている。さらに、制御棒は中性子を良く吸収する物質を用いて構成されており、中性子吸収物質としては炭化ホウ素( $B_4C$ )やハフニウム(Hf)が使用されている。Hfを用いた制御棒は、 $B_4C$ よりも制御棒価値(負の反応度)が(その絶対値が)小さくなることから、 $B_4C$ と同等の制御能力を与えるために制御棒全体をHfにすることはできず、減速材である水との割合を高めて、例えば薄いHf板(厚さ1mm程度)を2枚組み合わせるなどの構造としている。

## 【0013】

## 【発明が解決しようとする課題】

近年、プラントの定期検査における多大な保守工数、長期間を要する現状の改善、そのための原子炉の連続運転の長期化によりプラント稼働率および経済性の向上等が要請されてきている。しかし、上述した従来の構成ではこれに応えることができない。

## 【0014】

すなわち、従来の沸騰水型原子炉における燃料集合体と制御棒との大きさの組み合わせによっては、集合体の体積あたりの制御棒の幅が小さく、出力運転中の

制御棒価値が必ずしも十分でない。このため、運転期間を大幅に拡大しようとしても、必要な大きな余剰反応度の抑制ができない。

## 【0015】

また、ウラン燃料のみを使用する従来の燃料集合体では、運転期間を大幅に増大させようとした場合、燃焼初期において抑制すべき反応度が非常に大きくなり、可燃性毒物のみによっては十分に反応度を抑制できなくなる。

## 【0016】

また、従来の沸騰水型原子炉においてはウラン酸化物あるいはプルトニウム酸化物を燃料として用いているが、燃料密度がそれほど大きくとれず、大幅に運転期間を増大させようとする場合には燃焼度が過度に大きくなり、燃料棒の被覆管の腐食などの面から運転期間への制約が生じてしまう。

## 【0017】

さらに、大幅に運転期間を増大しようとする、余剰反応度を増加させる必要が生ずるが、従来の沸騰水型原子炉では、制御棒による制御能力の限界から十分な余剰反応度を持つことができない。

## 【0018】

さらにまた、従来の沸騰水型原子炉のスペクトルシフト運転では、反応度の調節を炉心流量の増減のみで行っているため、流量の低い運転をしている場合は燃料集合体の冷却能力が低下してしまう。

## 【0019】

また、従来の沸騰水型原子炉で用いている可燃性毒物の天然のガドリニアには中性子の吸収能力の小さい核が半数以上含まれているため、必要以上にガドリニウムの濃度を高める必要があり、ガドリニウムを含む燃料ペレットの構造的な安定性について不利となる。

## 【0020】

また、従来の沸騰水型原子炉で用いているHfを使用する制御棒では、反応度を $B_4C$ 並みとするためにはHfを薄く形成するなどの対策が必要であり、その結果、中性子の吸収が持続する期間を大きくすることができず、大幅な運転期間の拡大は図れない。

## 【 0 0 2 1 】

本発明は以上の諸事情を克服するべくなされたもので、燃料交換を必要とすることなく原子力プラントを連続的に 1 5 年以上に亘って運転することができ、これによりプラントの定期検査の保守工数や期間の短縮が図れ、ひいてはプラント稼働率及び経済性の大幅な向上に寄与することができ、しかも核拡散防止上も有効な原子炉炉心および原子炉運転方法を提供することを目的とする。

## 【 0 0 2 2 】

## 【課題を解決する為の手段】

発明者等においては、原子炉連続運転を 1 5 年以上に長期化する観点から、燃料および制御棒についての種々の研究を行ってきた。その結果、制御棒価値を高めるとともに、それに関連して燃料および制御棒の組成改善等により大きな余剰反応度の抑制を可能とし、前記の目的を達成し得る技術を開発した。

## 【 0 0 2 3 】

すなわち、請求項 1 の発明では、燃料棒とウォータロッドとを正方格子状に配置して構成される複数の燃料集合体を一定ピッチで正方格子状に配列し、これらの燃料集合体の隣接する 4 体の対向隙間に十字型制御棒の各翼をそれぞれ挿入配置する原子炉炉心において、前記十字型制御棒の各翼幅 (B) と前記燃料集合体の 1 ピッチを一辺とする正方形の面積で与える燃料格子面積 (S) との比 (B/S) を 0. 0 6 (1 / c m 単位) 以上に設定したことを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【 0 0 2 4 】

ここで、B / S の値は制御棒の翼幅と燃料集合体の面積に対応する数値であり、制御棒価値の大きさにおおよそ比例する。本発明では、この B / S の値を、従来の 0. 5 程度に対し、0. 0 6 以上となるよう十分に大きくすることにより、制御棒価値を大幅に増大した。したがって、大幅な運転期間の長期化、例えば 1 5 年連続運転を可能とする場合のように、必要となる大きな余剰反応度が必須となる原子炉においても、十分に余剰反応度を抑制することが可能となる。

## 【 0 0 2 5 】

本発明において望ましくは、B / S の値を 0. 0 6 5 以上、0. 0 8 以下とす

る。この $B/S$ の値が0.065以上であると、20年の連続運転が可能となり、0.075とすると確実に20年以上の連続運転が可能となる。 $B/S$ 値の上限を0.08とするのは、この値を超えると可動構造物である制御棒の大形化の限界となり動作性低下等を招くためである。

## 【0026】

本発明においては、請求項2に記載したように、燃料集合体を構成する燃料棒は、核燃料物質として、ウラン、プルトニウムもしくはその両者の酸化物もしくは窒化物を含む構成として具体化することができる。

## 【0027】

特に燃料物質をウラン、プルトニウムまたはこれらの窒化物として使用する場合には、酸化物に比して密度が大きくなるので、燃料集合体あたりの発生エネルギーが同一でも、燃料物質あたりの燃焼度を低くすることができ、これにより被覆管の腐食に対してより安全性の高い燃料とすることができる。

## 【0028】

請求項3の発明では、燃料集合体の周辺部に配置される燃料棒は、核燃料物質としてトリウムを含む原子炉炉心を提供する。

## 【0029】

トリウムを燃料集合体の外周位置に配置すると、トリウムが中性子を吸収してウラン233に転換する反応を促進することができる。これにより、燃焼初期に反応度を抑制し、燃焼後半に反応度を増大することができ、可燃性毒物による反応度調節量を減少することができる。その結果、ガドリニア量を減少することにより核燃料物質装荷量の増大が図れ、同一エネルギー発生量であっても燃焼度を低減することができるので、腐食の問題を軽減することができる。

## 【0030】

請求項4の発明では、燃料集合体を構成する一部の燃料棒は可燃性毒物を添加したものとし、その可燃性毒物の濃度を、可燃性毒物反応度が燃料取出時に実質的に零となる濃度に調整したことを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【0031】

これにより、可燃性毒物の添加量を低減し、燃焼効率を高めることができる。

## 【0032】

請求項5の発明では、可燃性毒物は、直径が50ミクロン以上200ミクロン以下の純粋 $Gd_2O_3$ 粒子を含むガドリニアであって、前記粒子が核燃料物質間に分散して存在し、かつガドリニアの当該燃料棒に対する重量割合が15wt%以上であることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【0033】

請求項6の発明では、ガドリニアのガドリニウム同位体のうち奇数質量数のガドリニウム同位体の合計の濃縮度が天然のガドリニウムよりも高濃縮度であることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【0034】

ガドリニウムは天然に存在する偶数質量数の同位体のものより、奇数質量数の同位体である $Gd155$ 、 $Gd157$ 等がウラン転化率が高いため、これを濃縮使用するものである。この場合、60wt%まで濃縮することが望ましい。なお濃縮ガドリニウムは、原子レーザー法により得られる。また、ガドリニウムは酸化ガドリニウム（ガドリニア）の形態で使用され、燃料中でのガドリニア濃度（燃料中のガドリニア重量割合）は15%以上が望ましい。ガドリニアは純粋のガドリニアを粒状に加工した上で、核燃料物質中に均一に分散させ、ペレットとして焼結形成される。粒状ガドリニアの直径はおおよそ50ミクロンから200ミクロンの範囲に分布し、平均の直径は約100ミクロンとすることが望ましい。

## 【0035】

請求項7の発明では、装荷される燃料集合体の全てについて、核分裂性物質平均濃縮度が同一とされていることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【0036】

請求項8の発明では、燃料集合体の核分裂性物質濃度が燃料集合体の下部側で高く、上部側で低く、かつ下部側の濃縮度と上部側の濃縮度との差が0.3wt%以上であることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

## 【0037】

請求項9の発明では、十字型制御棒は上部から挿入する構成とされていることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

【 0 0 3 8 】

このように、燃料下部の濃縮度を大幅に上部より高めることによって出力を大きく下部ピークとし、さらに上部挿入型の制御棒を用いることによって、運転サイクル初期での炉心平均ボイド率を 5 0 % 以上とすることができる。

【 0 0 3 9 】

請求項 1 0 の発明では、十字型制御棒の有効部分がすべてハフニウムで構成されており、そのハフニウム厚さが 0 . 8 c m 以上であることを特徴とする原子炉炉心を提供する。

【 0 0 4 0 】

このように、本発明では制御棒として従来の 1 m m 程度のものより大幅に厚い H f 板を用いることにより、従来では核的寿命が 5 年程度であったものを、2 0 年以上まで長期化できる。

【 0 0 4 1 】

請求項 1 1 の発明では、請求項 1 から 1 0 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、余剰反応度を 5 %  $\Delta k$  以上、1 0 %  $\Delta k$  以下として運転することを特徴とする原子炉運転方法を提供する。

【 0 0 4 2 】

本発明の方法では、余剰反応度を 5 %  $\Delta k$  以上 1 0 %  $\Delta k$  以下と従来に比して高い設定とすることにより、大幅な運転期間の拡大を行っても、制御棒によって十分な調整が可能となる。

【 0 0 4 3 】

請求項 1 2 の発明では、請求項 1 から 1 0 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、出力運転中の炉心平均ボイド率の最大値を運転サイクル末期以外の時点で発生させるとともに、炉心平均ボイド率の最小値を運転サイクル末期の時点で発生させ、かつ炉心平均ボイド率の最大値と最小値との差を 2 0 % 以上とすることを特徴とする原子炉運転方法を提供する。

【 0 0 4 4 】

請求項 1 3 の発明では、請求項 1 から 1 0 までのいずれかに記載の原子炉炉心を使用し、制御棒の 3 0 % 以上を挿入して運転することを特徴とする原子炉運転

方法を提供する。

【 0 0 4 5 】

このように、核燃料物質としてウランまたはプルトニウムまたはその両者を使用する沸騰水型原子炉において、出力運転中の炉心平均ボイド率の最大値を運転サイクル末期以外の時点で発生させ、炉心平均ボイド率の最小値を運転サイクル末期の時点で発生させ、炉心平均ボイド率の最大値と炉心平均ボイド率の最小値の差を 2 0 % 以上とすることにより、従来では実現できなかった大幅なスペクトルシフトが実現できる。

【 0 0 4 6 】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施形態について、図面を参照して説明する。

【 0 0 4 7 】

図 1 は、原子炉炉心の構成を説明するための燃料集合体および制御棒の拡大断面図である。なお、この図 1 においては 4 種類の異なる燃料集合体を同一個所に装荷した状態を示しているが、これは説明を簡易にするためであり、実際には各燃料集合体が炉心内位置に応じて適宜組合せとして装荷されるものである。

【 0 0 4 8 】

図 2 は上記炉心を適用する沸騰水型原子炉の原子炉圧力容器の構成を示す概略断面図である。図 3 は本発明の作用説明図である。

【 0 0 4 9 】

まず、図 2 によって本実施形態による沸騰水型原子炉の原子炉圧力容器の構成を説明する。この原子炉圧力容器は、内蔵型上部制御棒駆動機構を具備した自然循環型沸騰水型原子炉である。原子炉圧力容器 2 0 1 内の下部に炉心 2 0 2 が位置しており、この炉心 2 0 2 は炉心支持板 2 0 4 と上部格子板 2 0 5 とによって支持される燃料集合体 1 0 3 および制御棒 1 0 2 を正方格子状に配列して構成されている。

【 0 0 5 0 】

そして、この炉心 2 0 2 は自然循環炉であることを基本としており、炉心シュラウド 2 0 3 とシュラウドヘッド 2 0 7 とにより構成される自然循環増強用のチ



ムニー効果を利用して、再循環ポンプ無しに冷却材の自然循環を実現している。

【0051】

すなわち、制御棒駆動機構211はシュラウドヘッド207上に設けた制御棒駆動機構支持格子208上に固定されている。そして、複数本の制御棒案内筒213と炉心シュラウド203とによって形成される水単相流領域を移動しながら、制御棒駆動軸214により制御棒102を炉心202内から上方に引き抜くことができる構成となっている。

【0052】

炉心202内で発生した二相流は、制御棒案内筒213の筒部脇の二相流領域に沿って上昇し、強い自然循環力を発生する。これは炉心202が原子炉压力容器201内の下部に位置し、その上に制御棒案内筒213が存在することによるものである。

【0053】

なお、図2に示すように、本実施形態の原子炉压力容器201の炉心202位置より下方には、配管接続のためのノズル等が設けられていない。原子炉压力容器201に接続される主な配管としては、主蒸気管215、給水配管216および非常用炉心冷却系配管217などであり、これらは全て炉心202の上方に配設されている。図2中、209は気水分離器であり、210は蒸気乾燥器である。

【0054】

このように、制御棒駆動機構211を原子炉压力容器201内の炉心202上方に設置したことで自然循環方式の採用により、従来の沸騰水型原子炉の下鏡に存在した制御棒駆動機構取り付け用の多数のノズルやインターナルポンプの主軸が貫通するノズルが存在しないことにより、原子炉压力容器201周囲のドライウェル下部空間容積が最小化されており、この少ない空間への注水も容易なため、過酷事故対策においてその事象の進展を阻止する炉心溶融物の原子炉压力容器内保持（IVR：In Vessel Retention）が容易に可能となっている。

【0055】

次に、図1によって燃料集合体の構成および十字型制御棒の水平断面とその寸法例等について説明する。

## 【0056】

本実施形態の燃料集合体103は、複数の燃料棒100および単数または2本のウォータロッド107を規則的に7行7列に正方格子状に配置し、これをチャンネルボックス101によって囲繞した構成とされている。この燃料集合体103が原子炉圧力容器201内に一定ピッチで正方格子状に配列される。これらの燃料集合体の隣接する4体の対向隙間に十字型制御棒102の各翼102aがそれぞれ挿入配置されて原子炉炉心が形成される。

## 【0057】

本実施形態では、このような構成のもとで十字型制御棒102の各翼102aの幅(B)と燃料集合体103の1ピッチ(A)を一辺とする正方形の面積で与える燃料格子面積( $A \times A = S$ )との比( $B/S$ )を0.06以上に設定してある。

## 【0058】

具体的には、燃料集合体103は燃料集合体ピッチA(cm)ごとに配置されており、また十字型制御棒102の翼幅はB(cm)とされており、Aは例えば10.8cmであり、Bは8.7cmである。この場合、 $B/(A \times A)$ 、すなわち $B/S$ の値は約0.075となっており、従来の( $B/S$ )値である0.05程度に比して大きく設定してある。

## 【0059】

燃料集合体103の各燃料棒100は、核燃料物質として、ウラン、プルトニウムもしくはその両者の酸化物もしくは窒化物を含むものである。各燃料集合体103には、可燃性毒物入り燃料棒106が複数本、それぞれ隣接して配置されている。

## 【0060】

各燃料棒100について説明する。図1において、十字型制御棒102の左上および左下に示した各燃料集合体103a、103bの燃料棒100は、ウラン酸化物燃料ペレットを被覆管に充填した酸化物ペレット燃料棒108と、ウラン

酸化物に可燃性毒物であるガドリニアを添加したペレットを被覆管に充填した可燃性毒物入り燃料棒 106 とからなっている。ガドリニア燃料棒 106 は、各燃料集合体 103 a, 103 b の内側に配置されており、例えば図 2 の左上配置の燃料集合体 103 a の場合は燃料集合体断面四半分位置に 4 体ずつ、また図 1 の左下配置の燃料集合体 103 b の場合は燃料集合体断面四半分位置に 3 体ずつ、それぞれ集合状態で配置されている。

## 【0061】

ガドリニア燃料棒 106 に添加されるガドリニウム同位体としては、奇数質量数の同位体である Gd 157 のみを、レーザ法により、天然のガドリニウムよりも高濃度、例えば 60 wt % まで濃縮したものである。ガドリニアは純粋 Gd 203 を粒状に加工したうえ、核燃料物質間に均一に分散させてペレットとして焼結形成される。粒状ガドリニアは略球形であり、その直径はおおよそ 50 ミクロンから 200 ミクロンの範囲に分布しており、平均の直径は約 100 ミクロンである。また、燃料ペレット中でのガドリニア濃度（燃料ペレット中のガドリニア重量割合）、即ち燃料棒中の Gd 203 粒子の重量割合は 15 wt % 以上としてある。

## 【0062】

直径が 50 ミクロンから 200 ミクロンの範囲に分布した粒状ガドリニアを核燃料物質間に分布させることにより、ガドリニアより熱伝導の良い核燃料物質の熱伝導がガドリニア燃料棒の熱伝導として有効に働き、ガドリニアと核燃料物質を固溶体とした場合に比べ熱伝導を良くすることができる。なお、粒状ガドリニアの直径が 200 ミクロン以上の場合には、粒状ガドリニアを核燃料物質間に均一に分散させることが困難になり、また、粒状ガドリニアの直径が 50 ミクロン以下の場合には、混合状態のガドリニアと核燃料物質を固溶体とした場合に近づき、熱伝導も固溶体の場合に近づいて低下する。

## 【0063】

また、図 1 の右上に示した燃料集合体 103 c においては、周辺部に配置される燃料棒 100 が、核燃料物質として酸化トリウムを含むトリウム入り燃料棒 104 とされている。即ち、この燃料集合体 103 c においては、燃料棒 100 の

うちチャンネルボックス101に隣接するもののみをトリウム入り燃料棒104として、ウランやプルトニウムを含有しない燃料棒とする。

## 【0064】

このように、トリウム入り燃料棒104を燃料集合体の外周位置に配置することによって、トリウムが中性子を吸収してウラン233に転換する反応を促進することができる。これにより、燃焼初期に反応度を抑制し、燃焼後半に反応度を増大できることになり、可燃性毒物による反応度調節量を減らすことができる。

## 【0065】

その結果、ガドリニア量を減少させ、核燃料物質装荷量を増大することができ、各燃料集合体103ごとのエネルギー発生量を同一とした場合であっても、燃料棒100ごとの燃焼度を低減することができ、腐食の問題を軽減することができる。なお、トリウム入り燃料棒104以外の燃料棒100については、例えば図2の左下に示したものと同様である。

## 【0066】

また、図1の右下に示した燃料集合体103dは、酸化物ペレットではなく、窒化物ペレットを使用した窒化物ペレット入り燃料棒105としてある。なお、一部の窒化物ペレット入り燃料棒105には前記同様に、ガドリニアが添加されており、これにより可燃性毒物入り燃料棒が兼用される。

## 【0067】

核燃料物質の窒化物は、核燃料物質の酸化物に比較して密度が大きく、単位体積あたりに含まれる核燃料物質の量が多い。単位体積あたりの核燃料物質の量が多いため、同じエネルギーを発生しても、燃料棒に含まれる核燃料物質に対して燃焼している核燃料物質の割合は少なくなり、結果として燃料棒あたりの燃焼度を低くすることができる。

## 【0068】

このように、燃料物質をウラン、プルトニウムまたはこれらの窒化物として使用することにより、本実施形態の窒化物ペレット入り燃料棒105においては、酸化物を使用した燃料棒に比して核分裂物質密度が大きくなるので、燃料集合体あたりの発生エネルギーが同一でも、燃料棒あたりの燃焼度を低くすることができ

、これにより被覆管の腐食に対してより安全性の高い燃料とすることができる。

【0069】

以上の各燃料棒100を有する燃料集合体103においては、可燃性毒物反応度が燃焼後の燃料取出時に実質的に零となるよう濃度調整されるとともに、装荷される燃料集合体103の全てについて、核分裂性物質平均濃度が同一とされている。また、燃料集合体103の核分裂性物質濃度が燃料集合体103の下部側で高く、上部側で低く、かつ下部側の濃縮度と上部側の濃縮度との差を0.3wt%以上に設定してある。例えば、燃料集合体103における上下方向のウラン濃縮度の分布については、燃料集合体の有効部の中間位置を境界として下部の濃縮度が上部の濃縮度より0.3wt%大きくしてある。

【0070】

また、炉心に装荷される燃料集合体の全てについて、核分裂性物質平均濃度を同一としている。原子炉連続運転を15年以上としたため、従来の燃料交換を想定して、核分裂性物質平均濃縮度の異なる複数種類の燃料集合体を装荷する必要がない。このため、製造上複雑な工程を省略することができる。

【0071】

一方、制御棒102には中性子吸収材が組み込まれ、これによりHf製制御棒とされている。この制御棒を構成するHf板の厚さは、燃料集合体103同士の間隙のほぼ1/2の厚さに相当する8mmとされている。スクラム時の急速挿入を行うため制御棒の重量制限がありHfは重量があるため、その厚さを厚くすることが困難であったが、(B/S)値を0.06以上に設定したことと、制御棒を上部から挿入することにしたことによって8mmとすることが可能となった。

【0072】

このように、本実施形態では制御棒102が従来の1mm程度のものより大幅に厚いHf板を用いる構成であることにより、従来では核的寿命が5年程度であったものを、20年以上まで長期化することができる。

【0073】

次に、作用について説明する。

【0074】

図3に示すように、本実施形態では目標とする使用年数に対応して、制御棒価値を設定する。本実施形態では従来の $B/(A \times A)$ 値0.05に対して0.075と50%もの制御棒価値の増大となっている。したがって、大幅な運転期間の長期化、例えば20年以上の連続運転に必要となる大きな余剰反応度に対応しても、余剰反応度の抑制を行なうことができる。

## 【0075】

運転に際しては、図2に示すように、制御棒102を原子炉压力容器201上部から内蔵型制御棒駆動機構211により下降させ、その制御棒102を燃料集合体103のほぼ中央高さ位置まで挿入する。炉心の軸方向出力は下部にピークを持ち、軸方向キーキングの値は1.6以上となっている。運転初期においては、余剰反応度を十分に抑制するために制御棒102の30%以上を挿入する。余剰反応度は運転初期が最大であり、 $5\% \Delta k$ 以上 $10\% \Delta k$ の範囲となっており、運転期間の経過にしたがって余剰反応度が減少していく。

## 【0076】

本実施の形態では上述したように、燃料集合体103の核分裂性物質濃度が燃料集合体の下部側で高く、上部側で低くして下部の濃縮度と上部濃縮度の差が0.3wt%以上としてあり、さらに制御棒102が上部から挿入されているので、出力が下部ピークとなり、燃料集合体の下部側のボイド率が高くなる。この時、上部側のボイド率は下部側のボイド率の影響を受けるため、下部ピークとしたことにより上部側のボイド率が低下することはない。したがって、出力を下部ピークとすることにより炉心平均ボイド率を上昇させることができ、運転サイクル初期での炉心平均ボイド率を50%以上とすることができる。また、サイクル後半の最低の炉心平均ボイド率は30%以下で20%以上の炉心平均ボイド率差があり、従来実現できなかった大幅なスペクトルシフトが実現できる。

## 【0077】

したがって、本実施形態によれば、原子炉初装荷炉心から連続して一定期間、燃料交換を行わずに連続して運転することができ、例えば20年間運転した後、燃料の全数交換、つまり1バッチで燃料の取り替えを行なうという運用を行なうことができる。

## 【 0 0 7 8 】

また、本実施例では窒化物ペレット燃料棒 1 0 5 を使用することにより、燃料集合体 1 0 3 あたりの発生エネルギーが同一でも、燃料棒ごとの燃焼度を低くすることができ、燃料被覆管の腐食に対してより安全性を高めることができる。

## 【 0 0 7 9 】

さらに、トリウム入り燃料棒 1 0 4 を燃料集合体 1 0 3 の外周位置に配置することにより、トリウムが中性子を吸収してウラン 2 3 3 に転換する反応を促進できるため、燃焼初期に反応度を抑制し、燃焼後半に反応度を増大することができる。したがって、可燃性毒物による反応度調節量を減少することができ、その結果、ガドリニア量を減少して、核燃料物質装荷量を増大することができ、燃料集合体 1 0 3 が同一エネルギー発生量であっても燃料単位の燃焼度を低減することができ、この点からも腐食の問題を軽減することができる。

## 【 0 0 8 0 】

さらにまた、本実施形態によれば、余剰反応度を 5 % 以上 1 0 % 以下に設定したことにより、大幅な運転期間の拡大を行っても、制御棒 1 0 2 による十分な調整が可能となる。

## 【 0 0 8 1 】

また、本実施形態の制御棒 1 0 2 は従来のものに比して大幅に厚い H f 板を用いることから、従来核的寿命がせいぜい 5 年程度であったものが 2 0 年以上と長寿命化できる。

## 【 0 0 8 2 】

また、本実施形態の原子炉においては構成上、従来の同体積の燃料を持つ原子炉と比較して制御棒本数を 2 倍にすることができる。したがって、一部の制御棒の核的寿命が万一不十分となった場合にも、代替の制御棒が利用できる余地が大きく、この点からも大幅に長期の運転とする場合における炉心として、適切な制御棒価値を持続させることが可能である。

## 【 0 0 8 3 】

なお、以上の実施形態においては、7 行 7 列の燃料集合体として実施したが、本発明はこれに限らず、燃料棒径の調節により他の配列、例えば 8 行 8 列や、6

行 6 列の配列とすることも可能である。また、本実施形態では燃料集合体を従来の燃料集合体のおよそ 0.7 倍の大きさを前提として説明したが、 $B / (A \times A)$  の基準を満たす範囲において、さらに大きい集合体とすることも可能である。

【 0 0 8 4 】

【発明の効果】

以上のように、本発明によれば、15 年以上の長期間に亘って燃料交換を行なうことなく、連続的な運転が可能な炉心を実現することができる。したがって、プラントの定期検査の保守工数や期間の短縮によってプラント稼働率及び経済性の大幅な向上に寄与することができ、しかも運転終了後には燃料を原子炉圧力容器と一体で交換するようなシステムとすることも可能となり、核拡散防止上の見地からも有効なプラントを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明に係る原子炉炉心の一実施形態による燃料集合体および十字型制御棒を示す断面図。

【図 2】

図 1 に示した炉心を適用する原子炉圧力容器を示す断面図。

【図 3】

前記実施形態の作用説明図。

【符号の説明】

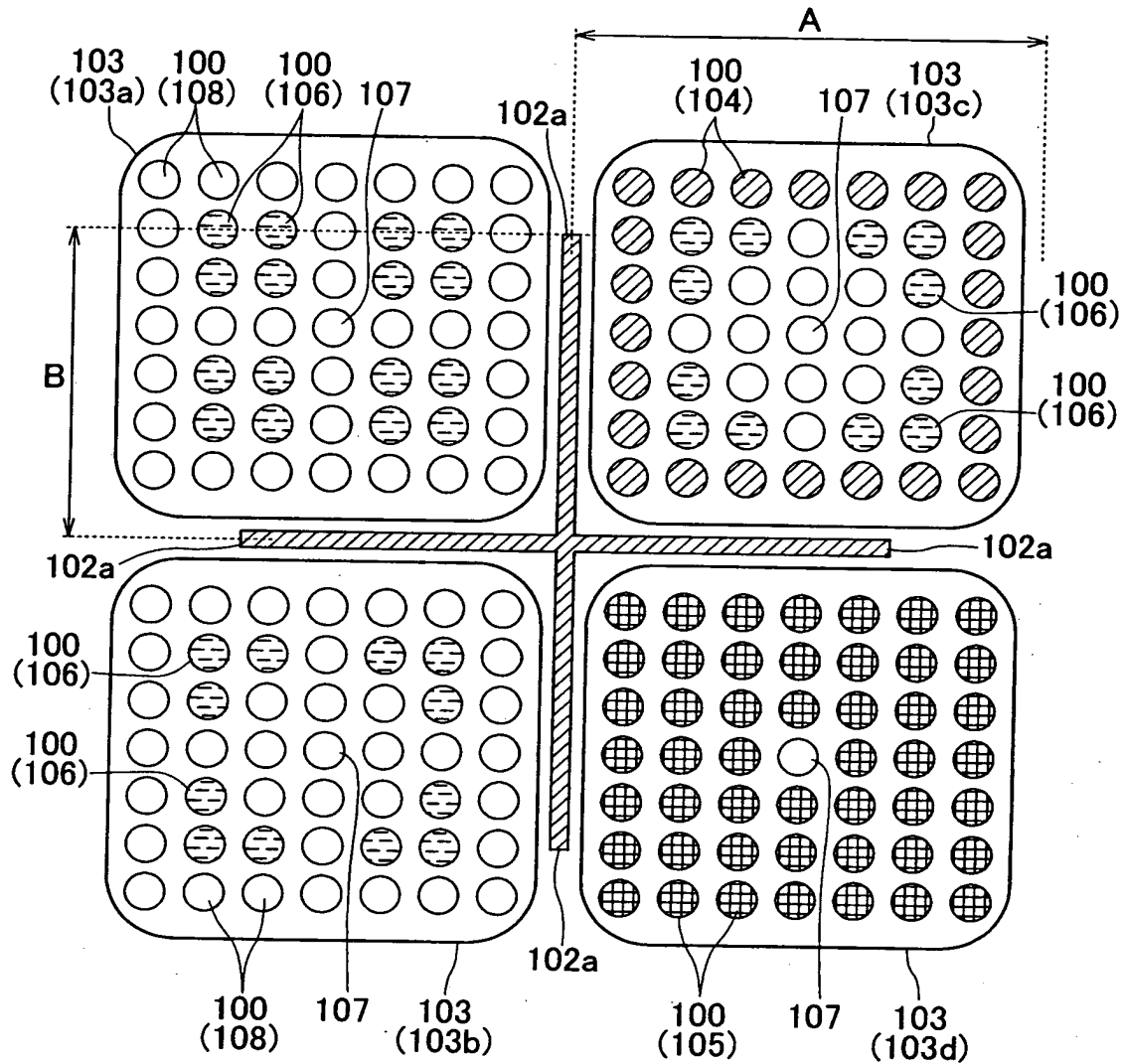
- 1 0 0 燃料棒
- 1 0 1 チャンネルボックス
- 1 0 2 十字型制御棒
- 1 0 3 燃料集合体
- 1 0 4 トリウム入り燃料棒
- 1 0 5 窒化物ペレット燃料棒
- 1 0 6 可燃性毒物入り燃料棒
- 1 0 7 ウォータロッド
- 1 0 8 酸化物ペレット燃料棒



- 2 0 1 原子炉圧力容器
- 2 0 2 炉心
- 2 0 3 炉心シュラウド
- 2 0 4 炉心支持板
- 2 0 5 上部格子板
- 2 0 7 シュラウドヘッド
- 2 0 8 制御棒駆動機構支持格子
- 2 0 9 気水分離器
- 2 1 0 上記乾燥器
- 2 1 1 制御棒駆動機構
- 2 1 3 制御棒案内筒
- 2 1 4 制御棒駆動軸
- 2 1 5 主蒸気管
- 2 1 6 給水配管
- 2 1 7 炉心冷却系配管

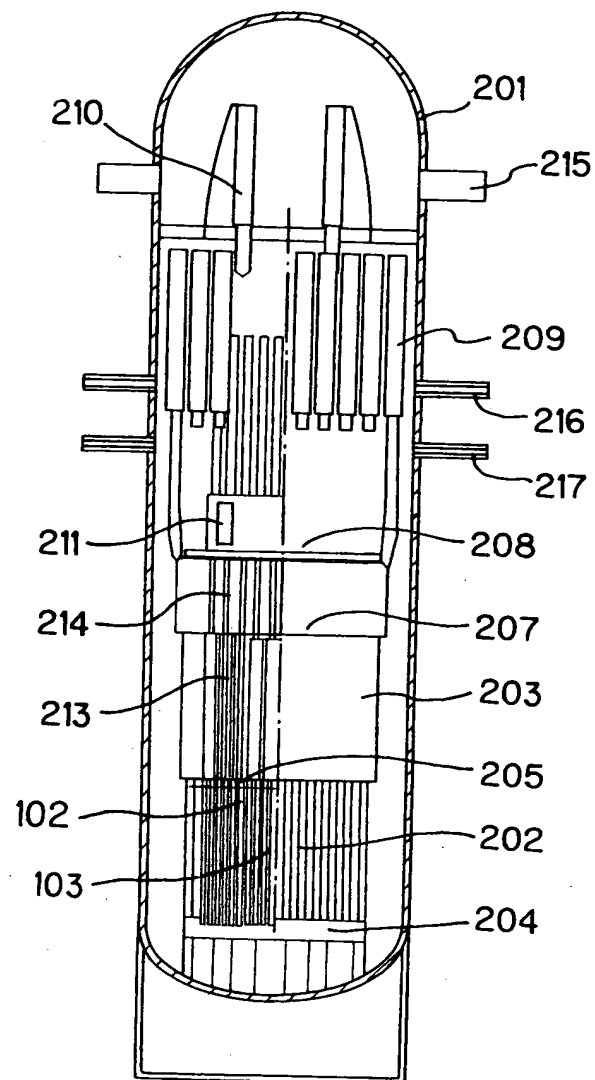
【書類名】 図面

【図 1】

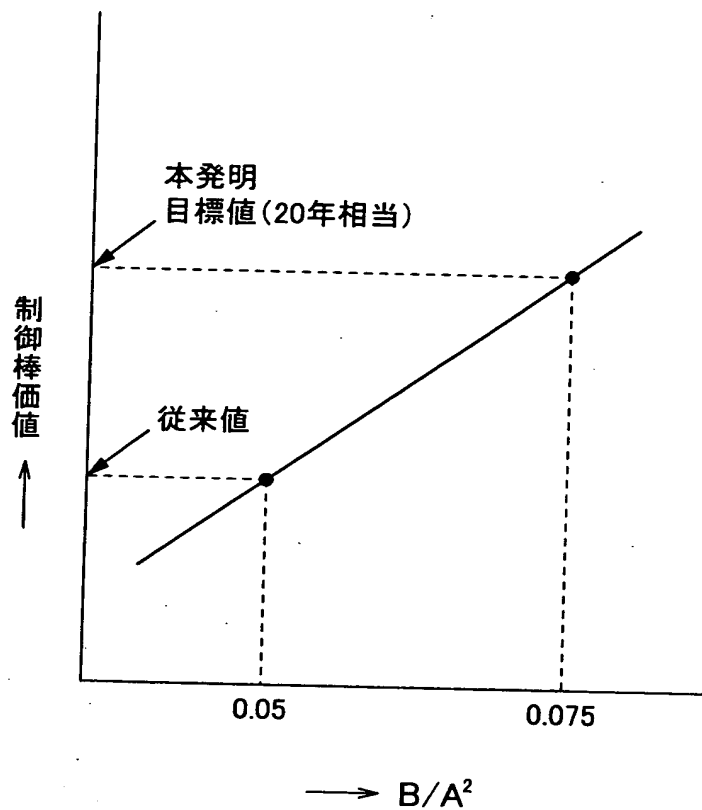


- 100:燃料棒
- 101:チャンネルボックス
- 102:十字型制御棒
- 103:燃料集合体
- 104:トリウム入り燃料棒
- 105:窒化物ペレット燃料棒
- 106:可燃性毒物入り燃料棒
- 107:ウォーターロッド
- 108:酸化物ペレット燃料棒

【図2】



【図3】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 燃料交換を必要とすることなく原子力プラントを連続的に 1 5 年以上に亘って運転することができ、プラントの定期検査の保守工数や期間の短縮が図れ、プラント稼働率及び経済性の大幅な向上に寄与でき、核拡散防止上も有効な原子炉炉心を得る。

【解決手段】 燃料棒 1 0 0 とウォーターロッド 1 0 7 とを正方格子状に配置して構成される複数の燃料集合体 1 0 3 を一定ピッチで正方格子状に配列する。燃料集合体 1 0 0 の隣接する 4 体の対向隙間に十字型制御棒 1 0 2 の各翼 1 0 2 a をそれぞれ挿入配置する。十字型制御棒 1 0 2 の各翼幅 (B) と燃料集合体 1 0 3 の 1 ピッチを一辺とする正方形の面積で与える燃料格子面積 (S) との比 ( $B/S$ ) を 0. 0 6 以上に設定する。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000003078]

1. 変更年月日 1990年 8月22日  
[変更理由] 新規登録  
住 所 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地  
氏 名 株式会社東芝
2. 変更年月日 2001年 7月 2日  
[変更理由] 住所変更  
住 所 東京都港区芝浦一丁目1番1号  
氏 名 株式会社東芝